

## Сталість процесу розмірної обробки металів електричною дугою непрофільованим електродом

В даній статті представлений аналіз перехідного і сталого процесу розмірної обробки металів електричною дугою непрофільованим електродом. Можливість вибору режимів обробки, дозволяє отримувати раціональне значення шорсткості при високій продуктивності.

**електрична дуга, електроерозія, металообробка, стаціонарний режим, перехідні і сталі процеси**

Одним із перспективних напрямків розвитку розмірної обробки дугою (РОД) є застосування непрофільованих електродів – інструментів (ЕІ) при виготовленні робочих деталей штампів, пресформ, валків прокатних станів, деталей, які працюють в умовах ударно-абразивного зносу (зуби ковшів екскаваторів, траки гусеничних машин, залізничні стрілочні переводи, хрестовини, корпуси енергопоглиначів, бронеплити дробарок і т.п.). Обробка непрофільованим ЕІ здійснюється без помітних механічних зусиль на інструмент та без силової дії на заготовку. Відсутня необхідність застосування спеціальних інструментів, більш твердих, ніж метал, що обробляється, а ЕІ стає більш дешевим, ніж інструмент при традиційних способах металообробки.

Як відомо [1], при реалізації процесу високопродуктивної розмірної обробки металів електричною дугою (РОД– розмірна обробка дугою) електрична дуга горить в міжелектродному зазорі (МЕЗ) в потужному поперечному потоці робочої рідини, внаслідок чого дуга, порівняно із звичайною зварювальною, стискується як в геометричному плані (зменшується висота стовпа та площа поперечного перерізу дуги), так і в енергетичному плані (підвищується напруженість електричного поля та густина сил технологічного струму в дузі). Таким чином, підвищується рівень гідродинамічного тиску потоку в МЕЗ, можна підвищувати точність обробки за рахунок зменшення висоти стовпа дуги, а отже величини МЕЗ. При цьому якість обробленої поверхні підвищується за рахунок локалізації джерела тепла, тобто шляхом зменшення площі поперечного перерізу дуги та часу її горіння на одному місці. Крім того, гідродинамічний потік інтенсивно безперервно вилучає продукти ерозії з МЕЗ і тим самим забезпечує необхідні умови для неперервної РОД.

Для успішного рішення задач досліджень процесу РОД, вибору і оптимізації технологічних режимів, діагностики і прогнозування показників якості, важливе значення має встановлення факторів. Електрична дуга в міжелектродному зазорі характеризується складним комплексом магнітогідродинамічних, теплових електромагнітних явищ, і її математичний опис заснований в загальному випадку на системі нелінійних рівнянь магнітній газодинаміки в відповідності крайовим вимогам [2].

В зв'язку з цим відомо, що статична похибка теплових, електричних, магнітних, зондових і інших вимірювань в електродугових апаратах і приладах рідше буває нижче 5–10%, тому з точки зору практичної можливості математичного опису спостерігаємих явищ від теорії не вимагає високої точності. Для практики частіше достатньо рішення, які засновані на приблизних методах, справедливості яких інколи може бути перевірена тільки на підставі порівняння результатів з експериментом [3].

Плазма електричної дуги при РОД, характеризується невисокою ступеню іонізації, яка має великий електричний опір, за рахунок чого важливіше значення при теплопереносі грає джоулеві тепловиділення. Для процесу РОД тепло, яке виділяється в МЕЗ при горінні витрачається на нагрівання і плавлення видаляемого при обробці металу, нагрівання заготовки, електрода-інструмента (ЕІ), а також на різні втрати. Оскільки теплові втрати в дузі відносяться до найбільш інерційних, то в цілому визначає її динамічні властивості, то доцільно при аналітичній побудові математичної моделі дузі, як елемента електричного ланцюга використовувати рівняння переносу енергії.

Для якісної обробки непрофільованим ЕІ [4] міцних зносостійких матеріалів способом РОД головною умовою є – забезпечення сталості горіння електричної дуги. Головною оцінкою є критерій при якому процес РОД є сталим, коли крутизна вольт-амперної характеристики дуги більше крутизни вольтамперної характеристики джерела живлення, яке живе цю дугу. Але при обробці, коли врізається електрод в заготовку, виникають перерви дуги або коротке замикання дугового проміжку, що приводе до порушення процесу або його припиненню. Однак вказані порушення режиму можуть виникати при виконанні умов сталості. В зв'язку з цим і представляє інтерес до вивчення сталості горіння електричної дуги при обробці непрофільованим ЕІ.

Математична модель. Розглянемо динаміку процесу під час одробки. Для моделі яка розглядається були зроблені припущення:

1. Довжина електричної дуги в МЕЗ дорівнюється величині зазору. Розмірами приелектродних ділянок і перехідних зон зневажаємо.

2. Переріз дугового стовпа в процесі горіння дуги постійне і визначається товщиною ЕІ.

3. Дуга має однорідну структуру, постійну температуру по всьому об'єму і постійну електропровідність на одиницю довжини. Зменшення напруги на дузі при збільшенні струму РОД пояснюється лиш зменшенням її довжини при збільшенні подачі електрода-інструмента, то провідність дуги залежить тільки від її довжини.

4. В процесі РОД на дугу діють різні сили. Це сили електромагнітної взаємодії сил, яка обумовлена градієнтом тиску в середині парового пузиря, який оточує дугу при РОД в воді або емульсії, сила гідродинамічного опору руху дугового стовпа і інше. Рахуємо дію усіх сил на дугу взаємно врівноваженими.

5. Ерозію інструмента в зв'язку незначної величини зносу не враховуємо.

Згідно робіт [5,6] складаємо систему рівнянь, яка складена на підставі спрощеної еквівалентної схеми Рис.1.

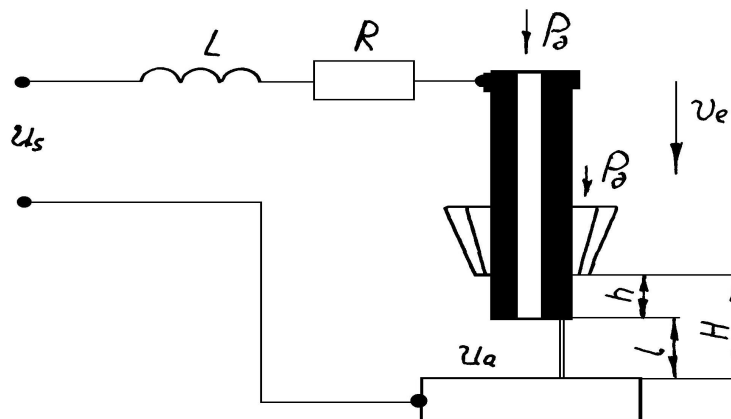


Рисунок 1 – Еквівалентна схема обробки

З урахуванням прийнятих припущень для одноконтурного електричного ланцюга з урахуванням джерела живлення постійного струму записуємо:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_a = u_s, \quad (1)$$

де  $L$  – повна індуктивність ланцюга РОД, яка визначається як сума індуктивностей струмопроводників, інструмента, джерела живлення і заготовки, Гн;

$R$  – сумарний активний опір ланцюга, який складається з внутрішнього опору джерела живлення, опору струмопроводників, перехідних опорів щітчастих контактів, контактів між заготовкою і її зажимами, опору контактних з'єднань між шинами, активний опір інструмента, Ом;

$i$  – струм в ланцюгу, А;

$u_a = u_0(i, l)$  – напруга на дузі, В;

$u_s = u_s(i)$  – напруга джерела живлення, В.

$$u_a = u_0 + El + S_a i, \quad (2)$$

$$u_s = u_x + S_s i, \quad (3)$$

де  $u_0$  – сума приелектродних падінь напруги, В;

$E$  – напруженість електричного поля в стовбі дуги, В/м;

$L$  – довжина дугового проміжка, м;

$S_a \equiv \partial u_a / \partial l$  – крутизна вольт – амперної характеристики дуги, В/А;

$S_s \equiv \partial u_s / \partial i$  – крутизна вольт – амперної характеристики джерела живлення, В/А;

$u_x$  – напруга холостого ходу, В.

$$E = 2,6 \cdot 10^3 \cdot i^{-0,05} P_d^{0,37}, \quad (4)$$

де  $P_d$  – динамічний тиск потоку  $Pa$ , який визначає гідродинамічний стан робочої рідини в МЕЗ.

$$l = H - h \quad (0 < l < l_k), \quad (5)$$

де  $H$  – відстань між торцем сопла і заготовки, м;

$h$  – довжина виліту електрода, м;

$l_k$  – критичне значення довжини дуги при якому відбувається її обрив, м.

Представляємо МЕЗ в вигляді апериодичного звена, який описується диференціальним рівнянням першого порядку

$$\frac{dh}{dt} = v_e - v_m, \quad (6)$$

де  $v_e$  – швидкість подачі електрода, м/с;

$v_m$  – швидкість обробки, м/с;

$t$  – текучий час, с.

$$v_m = Mi, \quad (7)$$

де  $M = \partial v_m / \partial i$  – крутизна плавлення заготовки при номінальному значенню струму  $i_0$  і виліту електрода  $h_0$ , м.

З урахуванням приведенного, з рівнянь (1,7) маємо:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri + u_a = u_s \\ u_a = u_0 + El + S_a i \\ L = H - h \quad (0 < l < l_k) \\ \frac{dh}{dt} = v_e - v_m, \quad v_m = Mi \end{cases} \quad (8)$$

Ця система рівнянь в прийнятих припущеннях, математично описує модель РОД непрофільованим електродом при обробці на постійному струмі. Розв'язавши рівняння (8) відносно  $l$  при  $H = const$ , маємо рівняння в вигляді:

$$T_e T_s \frac{d^2 l}{dt^2} + T_s \frac{dl}{dt} + l = q, \quad 0 < l < l_k, \quad (9)$$

де  $q$  – фіксуючий керуючий вплив;

$T_e$  і  $T_s$  – постійні часу, с.

$$q = \frac{u_x - u_0}{E} - v_e T_s, \quad (10)$$

$$T_e = \frac{L}{R}; \quad T_s = \frac{R}{EM}. \quad (11)$$

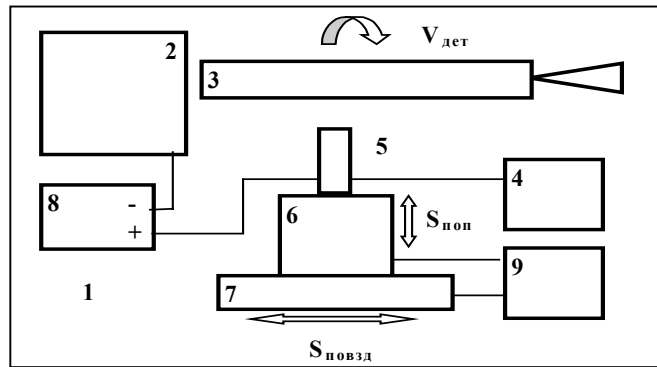
Рівняння (9), (10) і є математичною моделлю керуючого процесу зміни довжини дуги  $l = l(t)$  при обробці непрофільованим електродом способом РОД. Ця модель ураховує реальні фізичні обмеження на довжину дуги  $0 < l < l_k$ . Так як довжина дуги це керуючий фактор, тоді довжини дуги:

$$l_\infty = q = \frac{u_x - u_0}{E} - v_e T_s; \quad 0 < l_\infty < l_k. \quad (12)$$

З виразу (13) видно, що при збільшенні напруги холостого ходу  $u_x$ , або зменшення швидкості подачі електрода  $v_e$ , приводе до подовження дуги і збільшенню МЕЗ, то при критичному значенню  $l_k$ , відбувається обрив дуги і вона гасне. Збільшення  $v_e$  або зниження  $u_x$  приводе згідно виразу (12) до зменшення  $l_\infty$  і при значенні  $v_e = \frac{u_x - u_0}{ET_s}$ , значення довжини  $l_\infty$  дуги дорівнюється нулю. Якщо є зона сталих

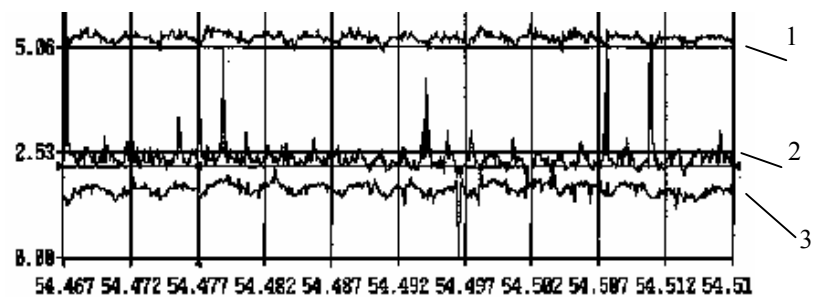
режимів, в якій не буде порушуватись обмеження на довжину дуги  $0 < l_\infty < l_k$ , то за рахунок керування параметрів  $u_x$  і  $v_e$  можливо встановити таке співвідношення, при якому процес РОД відбувається стало.

Згідно теоретичних основ, були проведені експериментальні дослідження способу точіння РОД непрофільованими ЕІ діаметром 20мм і внутрішнім діаметром отвору 9мм з ерозійного графіту марки МПГ-7 при обробці сталі 110Г18 зразків розмірами діаметром 50мм і довжиною 80мм. Робота виконувалась за допомогою електроерозійної головки АМУ-2, яка встановлена на токарно-гвинторізний верстат мод 1П611, при постійній частоті обертання патрону шпинделя верстата -33,5 об/хвил. В якості джерела струму використовувалось зварювальне джерело живлення ВДУ-504. Налаштування слідкуючої системи за підтримкою постійного міжелектродного проміжка виконувалось по максимально стабільному найбільшому значенню робочого струму для заданого режиму. Полярність обробки зворотня, що пов'язано із прагненням отримання мінімальної шорсткості обробленої поверхні при мінімальному зносі ЕІ. Обробка здійснювалась при прямому прокачуванні рідини (емульсії УСП-98) через ЕІ. Результати параметрів обробки реєструвались на ПЕОМ типу IBM PC/AT за допомогою плати АЦП моделі L-264 розрядністю 12 біт і максимальною частотою перетворення 200 кГц.



1 – база токарного верстата; 2 – патрон; 3 – деталь; 4 – станція робочої рідини; 5 – електрод;  
6 – електроерозійна головка АМУ-2; 7 – слідуєча система; 8 – джерело живлення;  
9 – станція гідропривода

Рисунок 2 – Схема установки



1- статичний тиск рідини; 2-напруга горіння дуги; 3- сила струму обробки  
Масштаби:  $\mu p_s=0.02$  Мпа/мм  $\mu U=1,4$  В/мм  $\mu I=12,5$  А

Рисунок 3– Осцилограма процесу обробки

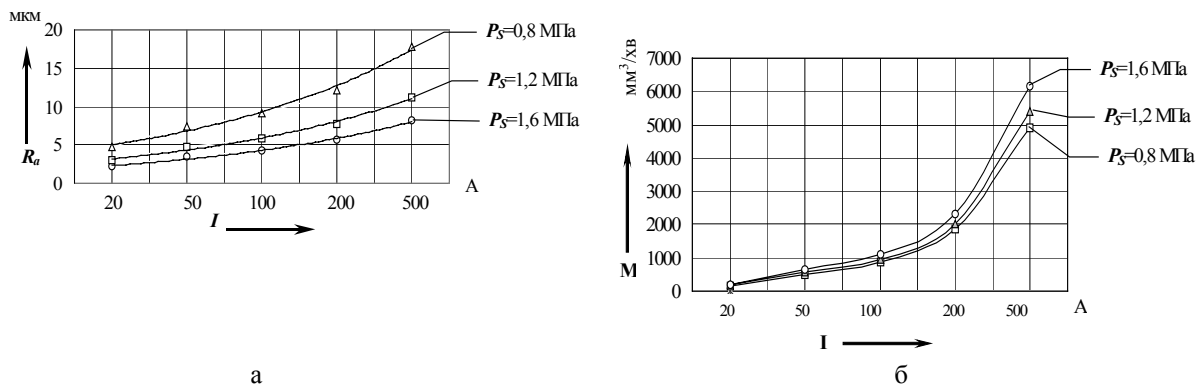


Рисунок 4 – Залежність (а) шорсткості обробленої поверхні  $R_a$  від  $I$  та  $P_s$  і  
залежність (б) продуктивності  $M$  від  $I$  та  $P_s$

Обробка осцилограми показує, що відбуваються перехідні процеси горіння дуги. Це пов'язано з підмиканням продуктів ерозії які уносяться з зони обробки, а також наявності електромеханічного згладжування (ефекту Аскіназі) [7]. При цьому відбувається зміна міжелектродного проміжку (МЕП), який відслідковує система автоматики. Зміна МЕП приводить до падіння потенціалу, а струми стійких дуг обумовлюють швидкість плавлення. Ступінчастий амплітудний аналіз осцилограми дозволяє встановити, що процес точіння відбувався при  $U_k + U_a = 22 \dots 25$  В. При

взаємодії дуги з потоком рідини, спостерігається явище самокерування енергетичних характеристик дуги (напруженості електричного поля і густини струму) в функції динамічного тиску. Площина поперечного перерізу дуги збільшується (зменшується) прямо пропорційно струму.

Встановлено, що продуктивність при обробці не залежить від твердості, та в'язкості металу, який обробляється, що важливо в умовах зростаючого застосування важкооброблюваних матеріалів. При точінні непрофільованим ЕІ основними факторами, які обумовлюють енергетичні та геометричні характеристики, фізичний механізм процесу і технологічні характеристики РОД є сила технологічного струму  $I$  і динамічний тиск  $Pd$ . Спосіб обробки дозволяє за рахунок зміни динамічного тиску отримувати на поверхні загартований шар металу (при температурі 1050-1100°C), що дозволяє фіксувати структуру аустеніту і запобігати виділенню карбідів, тим самим підвищувати міцність і зносостійкість матеріалу.

В зв'язку з цим обробка непрофільованим електродом представляє інтерес до розгляду проблеми важкооброблюваних матеріалів і дозволяє визначити основні напрямки досліджень і розробок в цієї області.

## Список літератури

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Афтореф. дис. д-ра техн. наук. 05.03.07/ НТУУ „КПІ”. – К.: 1999. – 36 с.
2. Десятков Г. А., Энгельшт В. С. и др. Теория цилиндрического дугового разряда. Фрунзе, 1985.
3. Жуков М. Ф., Урюков Б. А., и др. Теория термической электродуговой плазмы. Ч. 1–я. Методы математического исследования плазмы. Новосибирск, 1987.
4. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ „Імекс ЛТД”, 2002. – 300 с.
5. Цыбулькин Г. Н. Об одном алгебраическом условии устойчивости линейных динамических систем // Кибернетика и вычисл. Техника. – 1986. – Вып. 69.
6. Цыбулькин Г. А. Построение математических моделей в задачах адаптивного управления дуговой сваркой // Автоматическая сварка. – 1994. – №1.
7. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. М., 1968.

В данной статье представлен анализ переходного и установившегося процесса размерной обработки металлов электрической дугой непрофелированным электродом. Возможность выбора режимов обработки, позволяет получать рациональное значение шероховатости при высокой производительности.

The present paper describes the analysis of the transitive and established process of dimensional processing of metals by an electric arch a non-profiled electrode is submitted. The opportunity of a choice of modes of processing, allows to receive rational value of a roughness at high efficiency.